

Evolution temporelle de la morphologie des rides de sable lors de leur formation en canal à houle

Julie Lebunetel-Levaslot, Armelle Jarno-Druaux & François Marin

Laboratoire de Mécanique, Physique et Géosciences
Université du Havre - 53, rue de Prony - BP540 - 76058 Le Havre
julie.levaslot@univ-lehavre.fr

Résumé :

Les travaux présentés concernent des études expérimentales sur la dynamique de formation des rides de sable à partir d'un fond sédimentaire plat soumis à une houle régulière en canal à houle. Dès les premiers stades de formation, les longueurs d'ondes et les hauteurs de la totalité des rides présentes sur l'ensemble du réseau sont disponibles, permettant une étude statistique fiable des caractéristiques de rides. L'analyse de ces répartitions permet de caractériser le réseau au cours du temps. De plus, l'évolution des masses de rides ainsi que celle des cambrures locales sont obtenues. L'étude de ce dernier paramètre s'avère être précieuse car montre une stabilité bien supérieure aux longueurs d'ondes et hauteurs. L'objectif est de caractériser la dynamique de formation des réseaux de rides.

Abstract :

This paper deals with experimental studies about dynamical formation of ripples occurring on a flat sandy bottom under cyclic load in a wave flume. Wavelength and ripple height, present on the whole test section, are obtained allowing a statistical approach with a good agreement since the first stages of formation. The analysis of those distributions enables to describe with time the observed pattern. The access during ripple formation to mass ripple and local steepness, which are directly linked to ripple characteristics, is performed. Ripple steepness is precious information because of his stability. This work aims to characterize the patterns dynamics.

Mots-clefs :

Rides, morphodynamique, dynamique sédimentaire

1 Introduction

La formation et le développement de structures sédimentaires telles que les rides de sable sont des phénomènes complexes. De nombreuses études ont déjà été menées sur la formation des rides de sable sous l'action de la houle, permettant notamment la mise en place de modèles de prédiction des grandeurs caractéristiques des rides telles que les longueurs d'onde, hauteurs et cambrures (Nielsen (1981), Faraci et Foti (2002)).

Ces travaux mettent en évidence le fait que les principaux paramètres régissant la formation de ce type de structure sont le nombre de mobilité $\psi = (a\omega)^2 / (s-1)gD_{50}$, les nombres de Reynolds associés à l'écoulement ($Re = Ua/\nu$) et aux sédiments ($Re_D = UD_{50}/\nu$), le nombre de Shields $\theta = 0,5f_w\psi$, avec a l'amplitude du mouvement orbital de la houle, ω la pulsation de l'onde générée, s la densité des sédiments, D_{50} le diamètre médian, f_w le coefficient de frottement. Cependant, les processus physiques régissant la formation des rides de sable sous l'action d'un écoulement de type houle sont encore mal connus, et les résultats des différents auteurs, concernant la morphologie de ces structures sédimentaires sont très dispersés. Cette

étude a pour objectif de contribuer à la connaissance de la dynamique de formation des rides à partir de travaux expérimentaux réalisés en canal à houle.

Cette étude s'inscrit dans la suite de celle effectuée par Jarno-Druaux *et al* (2004). La technique expérimentale a été améliorée, permettant d'obtenir des informations qui n'étaient pas accessibles précédemment et d'améliorer ainsi la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu.

Les caractéristiques des rides sont recueillies sur l'ensemble de la veine d'essai et dès les premiers stades de formation. Le nombre de rides détectées permet d'étudier les caractéristiques des rides non seulement à l'aide de valeurs moyennes, et de valeurs les plus probables dans le réseau mais aussi à partir des allures des répartitions de ces grandeurs. L'étude des moments d'ordres supérieurs des histogrammes est donc réalisée.

2 Dispositif expérimental et méthode d'analyse

2.1 Dispositif expérimental

Les expériences ont été menées dans un canal à houle au LMPG de l'université du Havre. Un fond sableux plat est soumis à l'action d'une houle régulière générée par un batteur et contrôlée à l'aide de sondes résistives. Le canal à houle mesure 10m de longueur, 0,5m de largeur et 0,5m de profondeur. Il est muni d'un batteur à houle à une extrémité et d'une plage d'amortissement située à l'autre extrémité, permettant ainsi de limiter au maximum la réflexion de la houle. La technique expérimentale utilisée pour mesurer la morphologie des rides dans cette étude est optique. Ce procédé expérimental permet le suivi spatio-temporel de la bathymétrie du fond sableux, initialement plat. Une caméra crayon filme la trace laissée par une nappe laser sur la surface du lit perpendiculairement au sens de propagation de la houle. L'instrumentation est fixée à un chariot qui se déplace sur un rail le long du canal, et la trace recueillie par la caméra suit la bathymétrie de la veine d'essai à un instant donné.

Trois sables naturels de gammes granulométriques différentes et de densité relative $s=2.65$ ont été sélectionnés pour faire les tests ($D_{50}=111\mu\text{m}$, $D_{50}=163\mu\text{m}$, $D_{50}=375\mu\text{m}$). De plus, l'un des objectifs de ce travail est d'ouvrir la voie sur des études de tri sédimentaire au sein du milieu granulaire d'où l'acquisition d'un sable coloré ($D_{50}=174\mu\text{m}$). Le fond sableux est recouvert par 27cm d'eau. Avant chaque test, les sédiments sont remis en suspension et le lit est ensuite uniformisé de telle sorte qu'à chaque endroit de la veine d'essai l'épaisseur de la couche de sable soit de 25mm. Les quatre sables sont soumis aux expériences avec des conditions de houle identiques. Les conditions d'expériences fixent le nombre de mobilité entre 3,5 et 27.

2.2 Méthode d'analyse

L'originalité de la méthode utilisée se situe dans l'étude de la formation des réseaux au cours du temps à la fois d'un point de vue global mais aussi d'un point de vue local sur l'ensemble de la veine d'essai.

Une technique expérimentale basée sur l'acquisition et l'analyse d'images a été mise en place, permettant l'étude de la morphodynamique de formation des rides de sable. Les images sont recueillies à différents instants au cours de la formation des rides. Pour chaque série d'acquisition, la houle est arrêtée. A partir du film enregistré par une caméra mobile, chaque image est traitée. Une représentation en niveaux de gris représentant la position du fond sableux sur l'ensemble de la veine d'essai est obtenue à partir de l'ensemble des images acquises à l'instant considéré. Le domaine ainsi observé a pour dimensions 35cm de large, avec une résolution de 0,5mm/pixel, et 6m de long, avec une résolution dépendante de la vitesse de déplacement du chariot le long du canal, soit 0,5mm/pixel.

La détection des crêtes et des creux du signal associé aux niveaux de gris sur chaque ligne de l'image est requise dans le but de caractériser le réseau de rides observé.

La position des crêtes et donc la distribution des longueurs d'ondes sont obtenues en appliquant une transformée de Hilbert au signal. Les creux des rides sont détectés en appliquant le même principe de calcul au signal « miroir » du signal brut. La détection des crêtes et des creux permet d'obtenir la distribution à un instant donné des longueurs d'ondes L et hauteurs de rides h sur l'ensemble de la veine d'essai.

Une ride a été définie comme succession d'un creux, d'une crête et d'un creux. Dès qu'une ride est détectée, la cambrure (h/L) et la masse de celle-ci sont calculées, nous permettant ainsi d'obtenir la répartition d'informations locales sur l'ensemble du réseau de rides. La masse par unité de largeur est obtenue en intégrant le signal entre les deux creux de la ride. Deux filtres sont appliqués. Il s'agit, dans un premier temps, d'éliminer les rides ayant de très grandes longueurs d'ondes, bien supérieures à l'ordre de grandeur de celles caractérisant les rides. Ces motifs correspondent à des motifs ne représentant pas des rides, mais par exemple à des endroits du lit sableux encore plats, non ridés. La deuxième étape concerne la cambrure. A partir de l'angle de frottement interne du sable ϕ , une cambrure maximum peut être déterminée : $(h/L)_{\max} = 0,32 \tan(\phi) - 0,2$ (Nielsen (1979)). Les rides détectées ayant une cambrure supérieure ne sont pas prises en compte.

3 Résultats

Dans un premier temps, nous nous attachons à l'étude des longueurs d'ondes et hauteurs de rides présentes sur l'ensemble de la veine d'essai. Le nombre de rides prises en compte sur l'étude nous permet de compléter les études locales en ayant des informations sur l'ensemble du réseau avec une approche statistique fiable.

Les distributions des longueurs d'onde mais aussi des hauteurs de rides sont représentées au cours du temps, dès les premiers stades de formation des rides (FIG. 1). On constate une évolution des valeurs moyennes et des valeurs les plus probables croissante avec le temps.

L'étude des moments d'ordre supérieur va permettre d'analyser l'évolution des formes des distributions de ces grandeurs, permettant une meilleure analyse de la conception du réseau de ride. Nous nous focalisons ainsi notamment sur l'étude de l'écart-type $\sigma = \sqrt{\sum p(L_i)(L_i - L_m)^2}$, traduisant l'étalement des distributions et du coefficient d'asymétrie adimensionné $s = \sum p(L_i)(L_i - L_m)^3 / \sigma^3$. Ces deux grandeurs permettront de caractériser quantitativement les distributions de longueurs d'ondes et de hauteurs de rides.

Tout d'abord, nous avons pu mettre en évidence plusieurs étapes dans l'évolution du réseau de rides. La première est une phase de croissance rapide (de 0 à 700 cycles de houle) au cours de laquelle les longueurs d'onde et hauteurs de rides croissent d'une part, et d'autre part, les distributions s'affinent jusqu'à atteindre un étalement minimum des valeurs (FIG. 3b). A la suite de cette phase, tandis que les valeurs moyennes et les valeurs les plus probables de longueurs d'onde (respectivement notées L_m et L_p) et de hauteurs (respectivement notées h_m et h_p) sont relativement stables, les répartitions de ces grandeurs continuent à évoluer. D'un point de vue « valeur la plus probable », tout laisse supposer que l'état d'équilibre est atteint, de plus, ces valeurs sont proches de celles obtenues par Nielsen. Cependant, l'évolution des distributions permet de rejeter cette hypothèse (FIG. 1). On assiste en effet à un étalement des distributions de longueurs d'ondes et hauteurs de rides.

L'originalité de ces travaux réside dans la multiplicité et la précision des caractéristiques de rides rendues disponibles sur l'ensemble de la veine d'essai à différents instants de la formation du réseau. Après avoir obtenu les distributions de longueurs d'onde, puis de hauteur, les répartitions de cambrures locales sont maintenant disponibles. En se penchant sur les valeurs

les plus présentes de cambrures locales $(h/L)_p$, on constate que les valeurs de h_p/L_p sont supérieures (FIG. 2). Or, les distributions de longueur d'onde et de hauteurs, sont calculées simultanément sur l'ensemble du réseau mais indépendamment. Les rides dont la hauteur correspond au h_p du réseau ne possèdent donc pas explicitement la longueur correspondant au L_p du champ de rides. Les longueurs d'onde des rides de hauteur h_p sont récupérées et leur distribution permet de déterminer $(L/h_p)_p$, valeur la plus probable de longueur d'onde associée à h_p . Les cambrures locales sont donc maintenant comparées aux valeurs de $h_p/(L/h_p)_p$, (FIG. 2). Une meilleure corrélation, plus particulièrement pendant les premiers stades de formation correspondant à la phase de croissance rapide, est obtenue entre ces deux grandeurs qu'entre la cambrure locale et h_p/L_p . Les valeurs de longueurs d'onde de rides les plus présentes dans le réseau ne sont donc pas systématiquement associées aux hauteurs les plus présentes sur l'ensemble de la veine d'essai à un instant donné. Par conséquent, dès les premiers stades de formation des rides, le réseau est principalement constitué de rides de cambrures $(h/L)_p$ et non de rides ayant à la fois L_p et h_p comme caractéristiques.

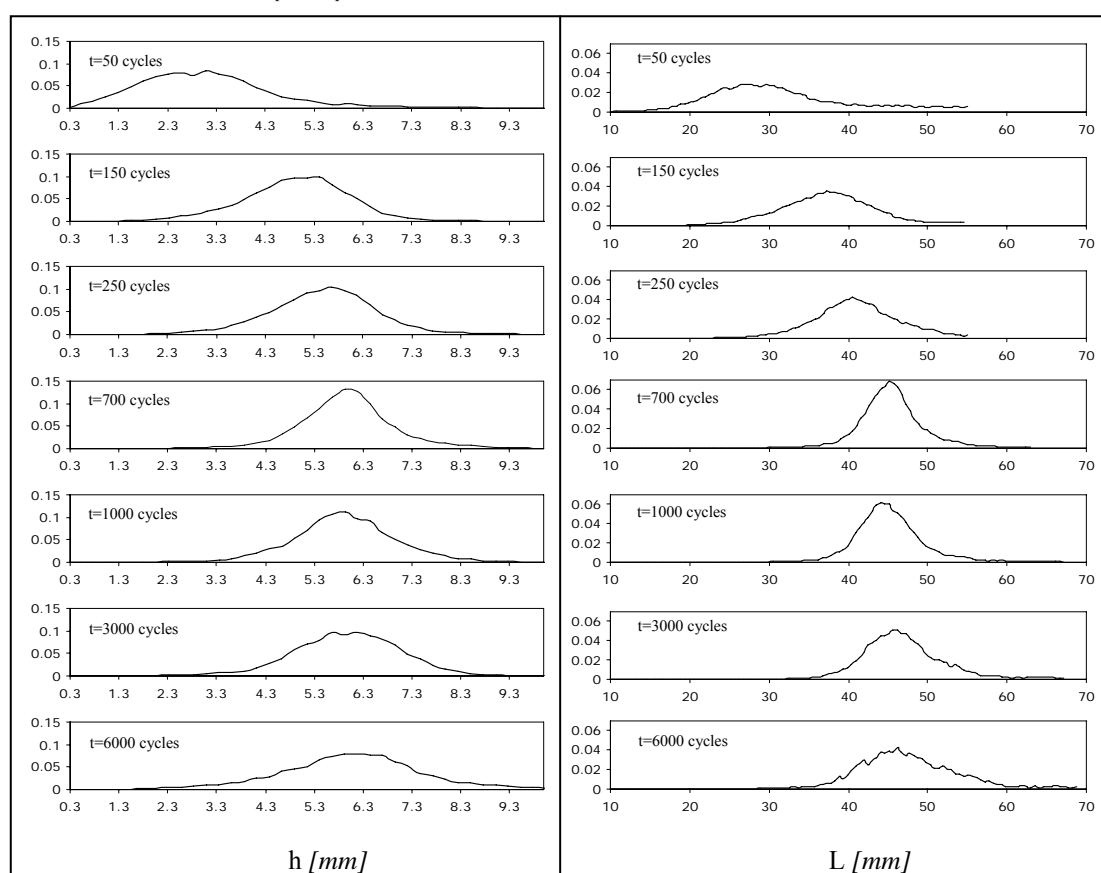


FIG. 1 – Probabilité de présence des hauteurs et longueurs d'onde de rides au cours du temps
 $D_{50}=163\mu\text{m}$, $\psi=17$ ($T=1,14\text{s}$, $L_w=1,58\text{m}$, $H_w=0,09\text{m}$), $R_D=40$, $R_e=9290$.

De la même manière que les distributions de longueurs d'ondes et hauteurs de rides ont été étudiées, l'évolution des répartitions de cambrures locales sur l'ensemble du réseau, au cours de la formation des rides est analysée. Les moments d'ordre supérieurs des cambrures, longueurs d'ondes et hauteurs sont représentés (FIG. 3). Grâce à l'évolution temporelle des cambrures locales les plus présentes (FIG. 4b), on observe toujours cette phase de croissance rapide définie précédemment. Puis, l'étude de l'écart type associé aux cambrures (FIG. 3a) montre un étalement de la répartition dont la tendance semble mieux définie pendant la phase de croissance

rapide (jusqu'à 700 cycles) que celle observée pour les longueurs d'ondes de rides. Notons que l'asymétrie des histogrammes de cambrures tend vers 0 assez rapidement (à partir de 1000 cycles - (FIG. 3b)). Il s'avère que les distributions des cambrures locales des rides sur l'ensemble de la veine d'essais dès les premiers stades de formation semblent plus stables que les longueurs d'ondes et hauteurs du réseau prises indépendamment. De plus la probabilité de présence de la cambrure la plus probable est plus importante que celle associée aux longueurs d'ondes et hauteurs les plus probables (FIG. 4a). Ceci est valable tout au long de la formation des rides, dans le cas représenté ici, $p((h/L)_p) \sim 3 \times p(L_p)$. Ainsi, dans le réseau, si on sélectionne les rides ayant la cambrure locale caractéristique du champ de rides, on aura plus de rides détectées.

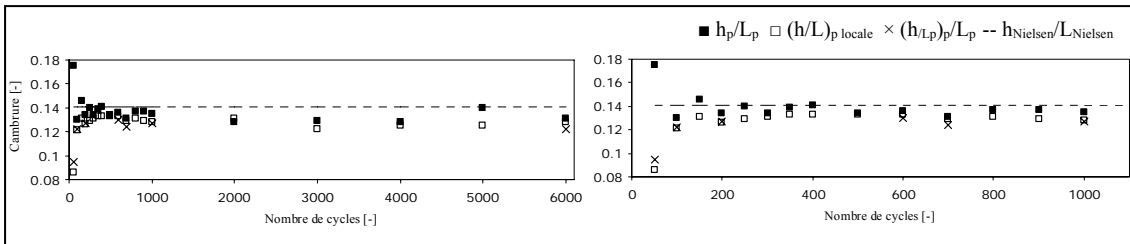


FIG. 2 – Comparaison entre cambrure locale et h_p/L_p au cours du temps

$D_{50}=163\mu\text{m}$, $\psi=17$, $R_D=40$, $R_e=9290$.

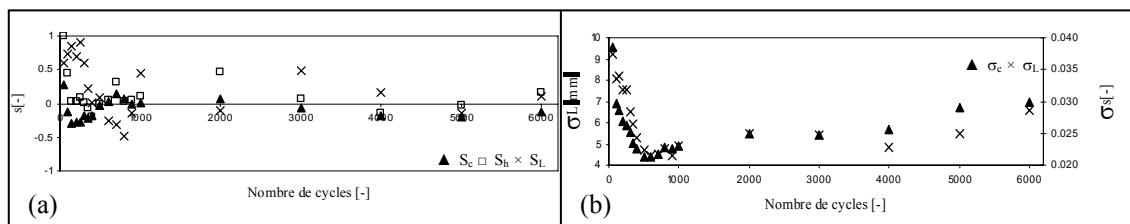


FIG. 3 – Evolution du coefficient d'asymétrie et de l'écart type des distributions de longueurs, hauteurs et cambrures locales au cours du temps - $D_{50}=163\mu\text{m}$, $\psi=17$, $R_D=40$, $R_e=9290$.

où S_g et σ_g sont respectivement le coefficient d'asymétrie et l'écart-type associés à la grandeur g

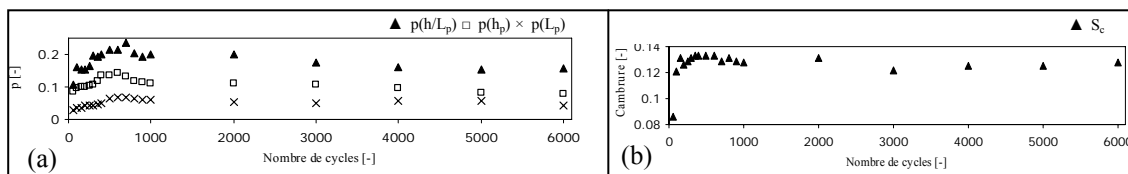


FIG. 4– (a) Evolution des probabilités de présence des valeurs les plus probables de h/L , h et L au cours du temps (b) Evolution temporelle de $(h/L)_p$ - $D_{50}=163\mu\text{m}$, $\psi=17$, $R_D=40$, $R_e=9290$.

Directement à partir du traitement explicité en 2.2, une image squelettisée du réseau de rides est générée. Cela consiste à produire une image noire excepté à l'endroit où une crête, appartenant à une ride, est détectée. Le pixel « positionné » sur la crête, aura pour valeur, en niveaux de gris, la hauteur de la ride. Cette image permet ensuite de repérer plus facilement les zones où les rides sont détectées, distinguer les zones de grandes et petites longueurs d'ondes et de vérifier les valeurs de hauteur. Couplée à la cartographie de la totalité du fond sableux (FIG. 5a), elle permet à la fois de discerner les zones de grandes ou petites longueurs d'ondes, hauteurs de rides ainsi que les endroits où des motifs plus complexes peuvent apparaître et dans quelles mesures elles interviennent dans la répartition des différentes caractéristiques de rides. Sur le même principe, une image peut être créée en ne faisant apparaître que les rides dont la

cambrure locale correspond à la cambrure locale la plus présente dans le réseau à chaque instant. Ainsi, le suivi de rides ayant des caractéristiques fixées pourra être effectué.

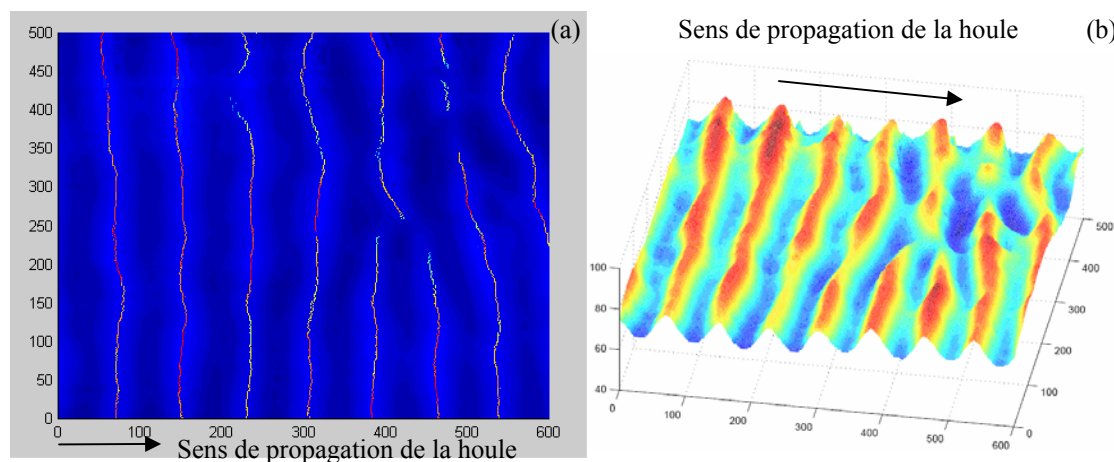


FIG. 5 – Bathymétrie partielle du fond sableux après 350 cycles d'excitation (unités en pixels)
 (a) avec lignes de crêtes détectées après traitement (b) cartographie 3D.
 $D_{50}=163\mu\text{m}$, $\psi=17$, $R_D=40$, $R_e=9290$.

4 Conclusions

De nombreuses caractéristiques des rides telles que les longueurs d'ondes de rides, les hauteurs, cambrures et masses de rides sont obtenues grâce aux différentes techniques d'instrumentation optiques et d'analyses mises en place dans le cadre de cette étude. En complément des valeurs moyennes et plus probables, traditionnellement utilisées pour l'étude des caractéristiques de rides, nous avons accès maintenant aux répartitions de ces grandeurs au cours du temps et sur l'ensemble de la veine d'essai. Ces distributions, dont l'étude passe par l'analyse des moments d'ordres supérieurs qui y sont associés, nous informent sur l'état du réseau à chaque instant. L'intérêt des paramètres sélectionnés pour l'étude des rides du réseau croît avec le nombre de caractéristiques des rides qu'ils prennent en compte. L'étude des cambrures s'avère en effet très précieuse. L'évolution d'une « ride type », basée sur les résultats de cambrure locale la plus présente dans le réseau permettra de mettre en évidence les phénomènes intervenants au cours de la dynamique formation des rides. (croissance, migration, changement de motifs...)

Références

- Faraci, C. & E. Foti 2002 Geometry, migration and evolution of small scale bedforms generated by regular and irregular waves. *Coastal Engineering* **47**, 35-52
- Jarno-Druaux, A., J. Brossard, & F. Marin 2004 Dynamical evolution of ripples in a wave channel. *European Journal of Mechanics B/Fluids* **23**, 695-708.
- Nielsen, P. 1979 Some basic concepts of wave sediment transport. Series paper n°20, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby.
- Nielsen, P. 1981 Dynamics and geometry of wave generated ripples. *Journal of Geophysical Research* **86**(7), 6467-6472.